



**Спецкурс ОСФИ**

**Лекция 4**

**16 марта 2011**

# Цветовая температура. Точка белого. Адаптация. Спектр из цвета.

---

Алексей Игнатенко, к.ф.-м.н.

Лаборатория компьютерной графики и  
мультимедиа ВМК МГУ

# План

---

- Точка белого
- Цветовая температура
- Хроматическая адаптация
- Построение спектра по цвету

# Переход между базисами – что умеем и что еще осталось

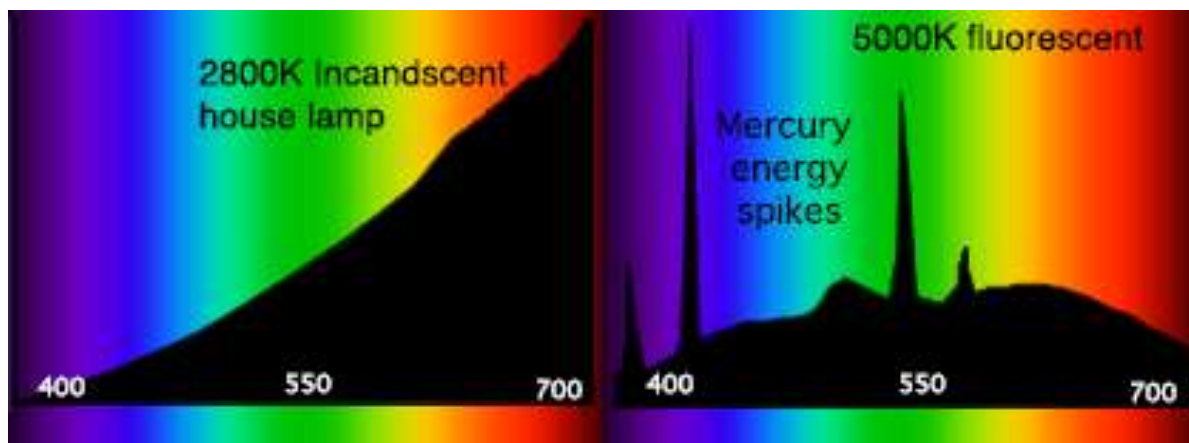
---

- Наша задача – преобразование между разными цветовыми пространствами
- Умеем переходить между базисами
- Но еще нужно:
  - Учитывать изменение точки белого
  - Обрабатывать выход за пределы диапазона

# Источник света и точка белого

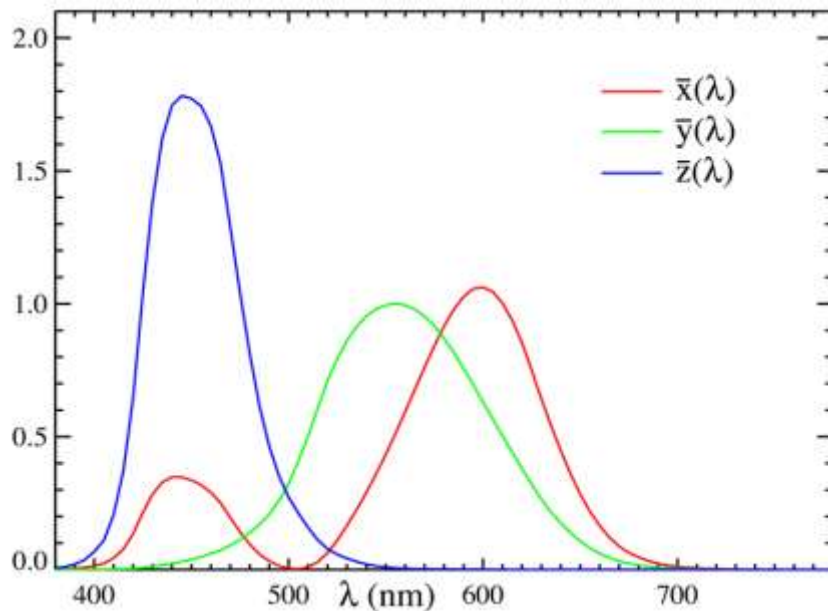
---

- **Источник света (illuminant)** задается спектральным распределением
- Для каждого источника можно найти **точку белого (white point)** – это его цвет в системе CIE xY
- Как получить координаты xY по спектру?



# Повтор: как получить хроматические координаты $x_u$ по спектру?

---



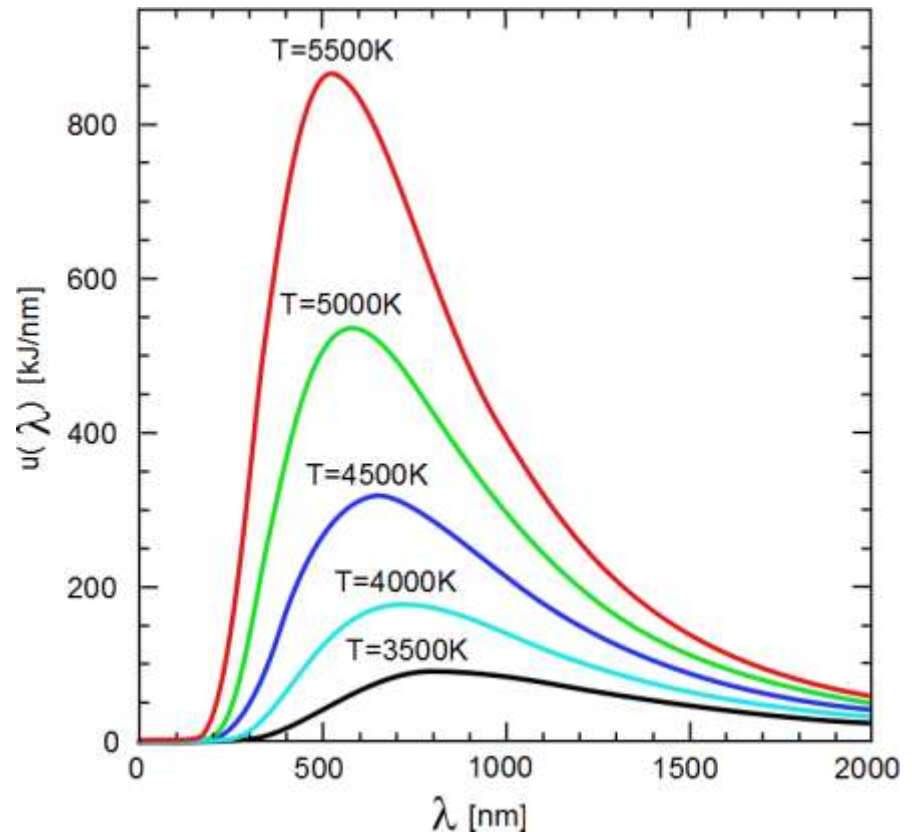
$$X = \int_{\lambda=380}^{780} C(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{\lambda=380}^{780} C(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda=380}^{780} C(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

# Абсолютно черное тело

- Абсолютно черное тело (ideal black body) – в физике это тело, поглощающее все попадающее на него излучение
- Т.е. тело ничего не отражает и не пропускает
- Однако оно излучает разные спектры излучения в зависимости от температуры
- Можно посчитать точку белого для черного тела и выразить ее через температуру в кельвинах
- Температурное излучение объекта (солнце, лампа и т.п.) можно описать в терминах температуры абсолютно черного тела.



# Как посчитать точку белого для абсолютно черного тела?

---

- Закон Планка

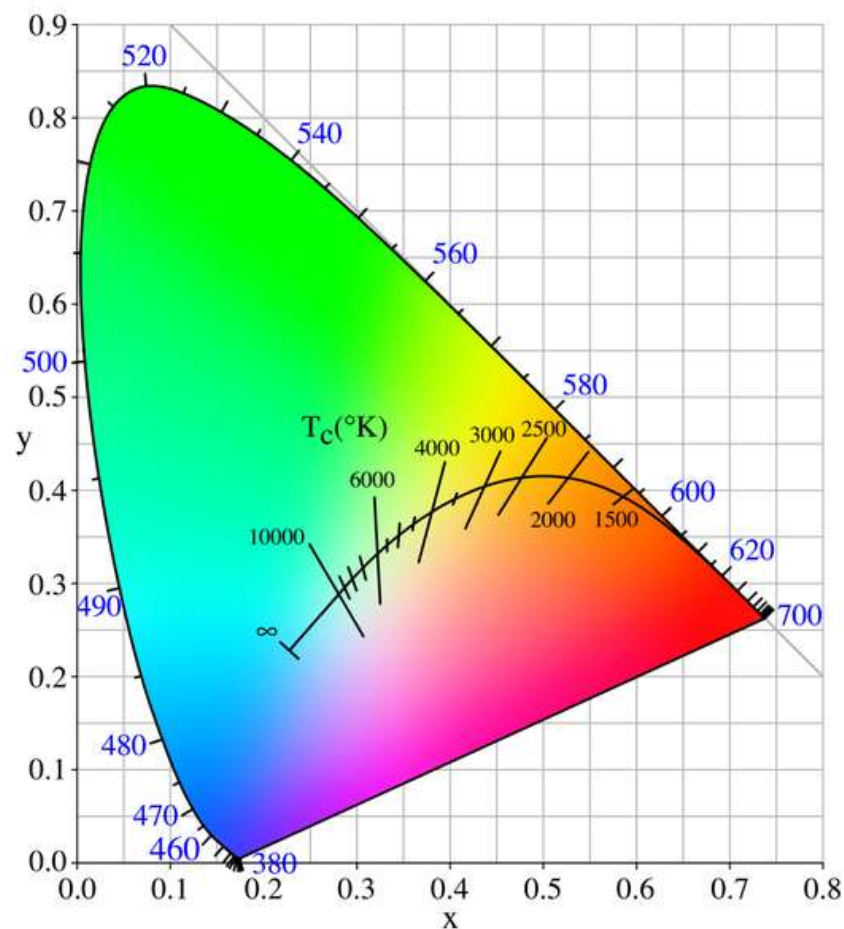
$$I(\nu, T) d\nu = \left( \frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

- $I(\nu, T)$  - яркость (Вт/м<sup>2</sup>/ст/м) в диапазоне  $\nu+d\nu$
- $h$  – постоянная Планка
- $c$  - скорость света
- $k$  - постоянная Больцмана
- $\nu$  - частота излучения
- $T$  – температура в Кельвинах

Из этого получаем спектр, из спектра – цвет

# Цветовая температура: примеры

- 1600 К: восход и закат
- 1800 К: свеча
- 2800 К: лампа накаливания
- 3200 К: студийные лампы
- 5200 К: яркое полуденное солнце
- 5500 К: усредненный дневной свет
- 6000 К: облачное небо
- 20000 К: ярко-синее чистое небо
- 28000 - 30000 К: молния





# Соотнесенная цветовая температура

---

- В реальном мире только лампы накаливания имеют свойства, близкие к идеальному черному телу
- Поэтому необходимо расширить систему описания цветовой температуры для включения туда близких по цвету источников
- Соотнесенная цветовая температура для данного источника – это цветовая температура абсолютно черного тела, наиболее близкая по цвету к данному источнику (при одинаковой яркости и условиях наблюдения)

# Однородное цветовое пространство (Uniform Color Space)

---

- Для данного источника света необходимо найти наиболее близкую точку на кривой Планка
- Чтобы близость по расстоянию соответствовала воспринимаемой близости, необходимо перейти в другое цветовое пространство

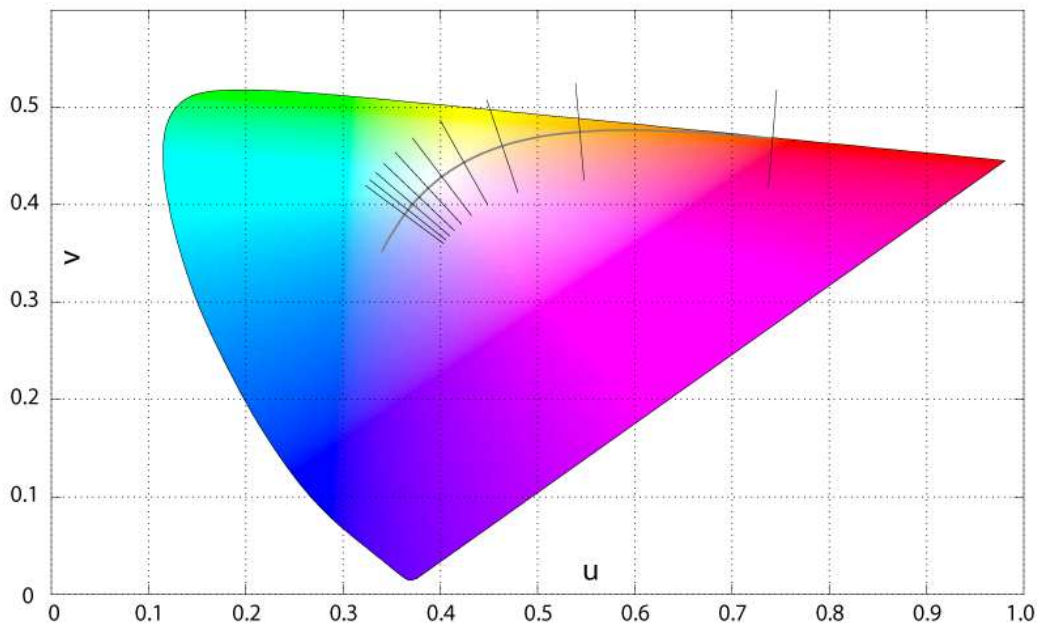
# Пространство CIE 1960 UCS

$$u = \frac{5.5932x + 1.9116y}{12y - 1.882x + 2.9088}$$

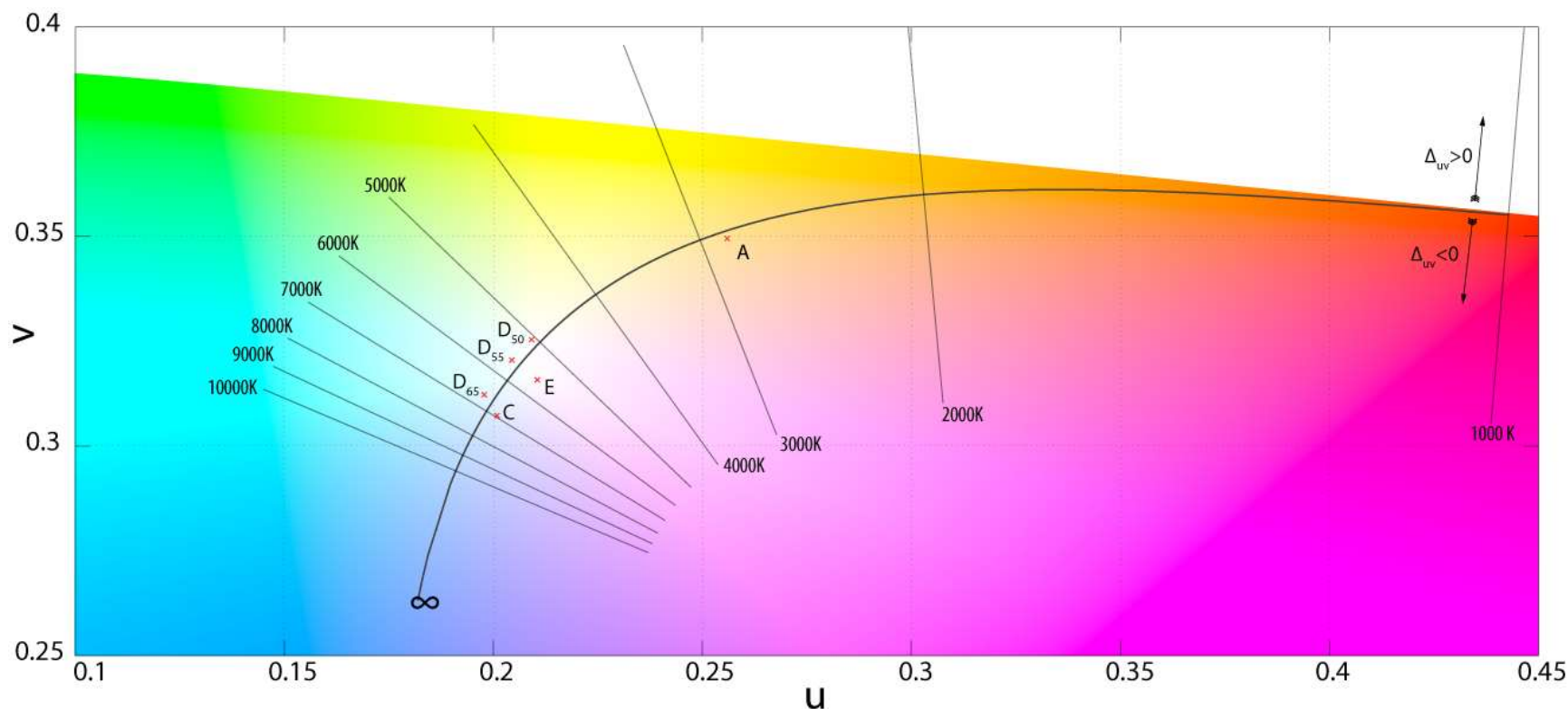
$$v = \frac{7.8972y}{12y - 1.882x + 2.9088}$$

В этом пространстве расстояние от источника до кривой Планка вычисляется по перпендикуляру

Больше ни для чего не используется! (см. CIE L\*u\*v\*, CIE L\*a\*b\*)



# Пространство CIE 1960 UCS



Любой источник теперь можно описать его CCT + delta UV

Но это имеет смысл только для источников, близких к кривой Планка

# Стандартные источники CIE

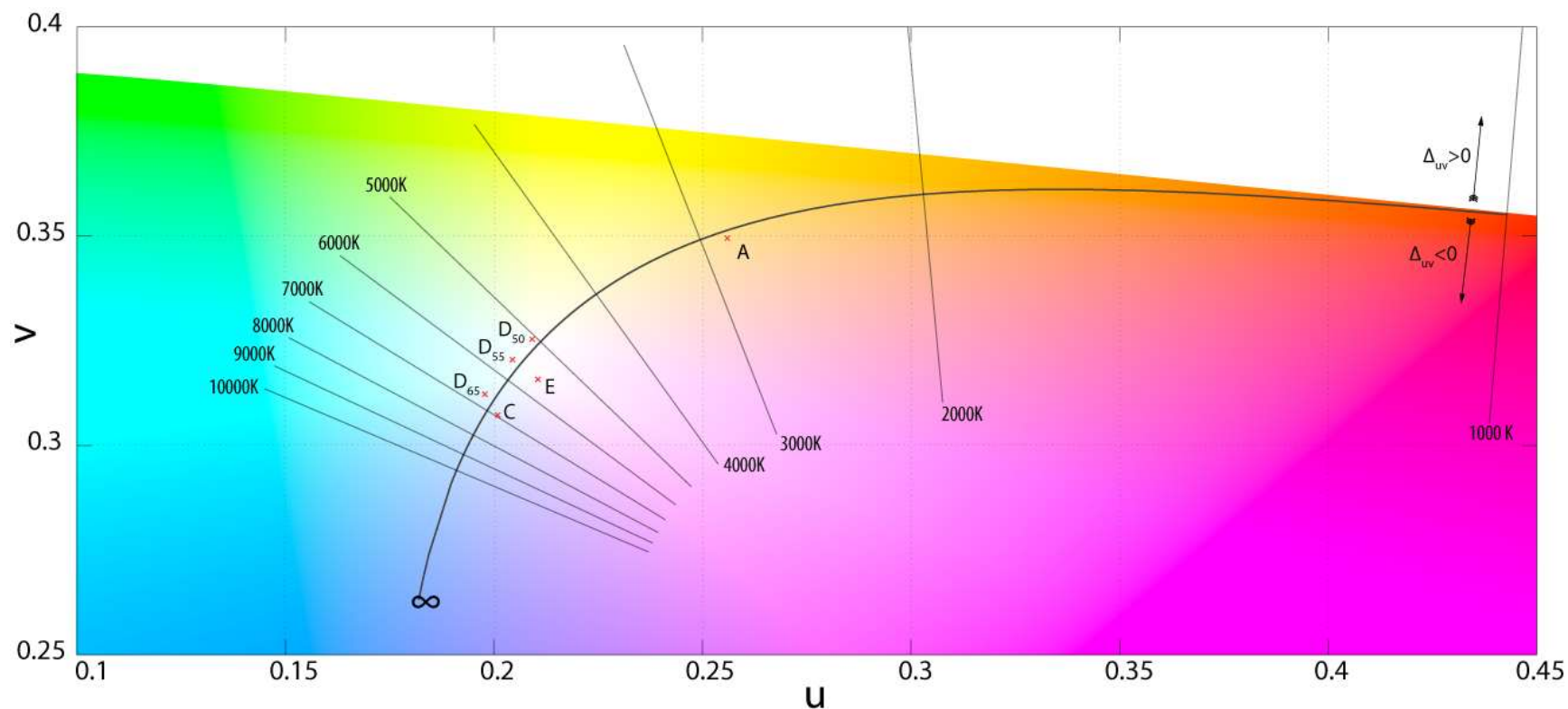
Имя	CIE 1931		CCT	Прим
	x	y		
E	1/3	1/3	5400	Точка равной энергии
D55	0.33242	0.34743	5500	
D65	0.31271	0.32902	6500	TV, sRGB
D75	0.29902	0.31485	7500	
A	0.44757	0.40745	2856	Лампа накаливания

# Серия стандартных источников D

- Результат анализа большого количества спектров дневного освещения
- На основе PCA-анализа результатов выявлена возможность построения разных спектров дневного света на основе варьирования трех параметров
- S0 (blue) – средний спектр
- S1 (green) – желто-синий (солнце, облака)
- S2 (red) – фиолето-зеленый (водяные пары)

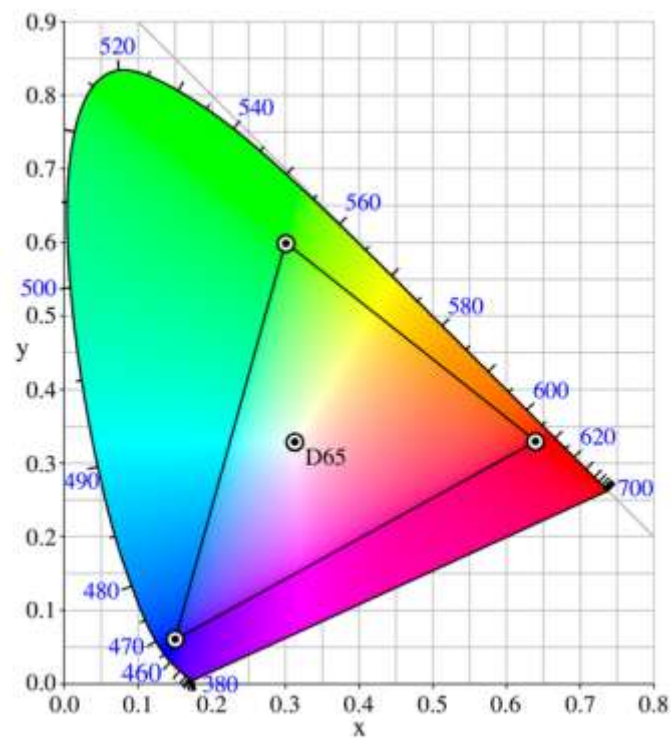


# Стандартные источники на CIE 1960 UCS



# Спецификация базовых источников с помощью точки белого

- Для полной спецификации обычно задают
  - $x, y$ -координаты для  $r, g, b$ -источников
  - точку белого (относительная яркость)



Пространство sRGB (основные цвета и точка белого)



# Спецификация RGB элементов: точка белого

---

- Точка белого – цвет, который считается белым в данных условиях
- Для монитора – цвет, который испускают фосфоры с максимальной яркостью (1,1,1)
  - Фактически задает относительные яркости фосфоров
- Обычно точка белого для монитора выбирается как точка белого одного из стандартных источников CIE (часто D65)

# Преобразование цветовых пространств заданных точкой белого

---

## Вход:

1. Хроматические координаты базовых источников
2. Хроматические координаты точки белого

$$(x_r, y_r)$$

$$(x_b, y_b)$$

## Этапы решения:

1. Будем искать сразу матрицу преобразования RGB->XYZ
2. Построим преобразование в RGB для точки белого, т.к. мы знаем, что в RGB она будет равна (1,1,1)

$$(x_g, y_g)$$

$$(x_w, y_w)$$

# Преобразование цветных пространств заданных точкой белого

---

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 \\ Z_1 & Z_2 & Z_3 \end{pmatrix}$$

# Преобразование цветových пространств заданных точкой белого

---

Достраиваем координаты в CIE XYZ по координатам CIE xyY

$$X_i = \frac{x_i Y_i}{y_i}$$
$$Z_i = \frac{z_i Y_i}{y_i}$$

# Преобразование цветных пространств заданных точкой белого

---

$$\begin{pmatrix} \frac{x_w}{y_w} \\ 1 \\ \frac{z_w}{y_w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_r Y_r}{y_r} & \frac{x_g Y_g}{y_g} & \frac{x_b Y_b}{y_b} \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ \frac{z_r Y_r}{y_r} & \frac{z_g Y_g}{y_g} & \frac{z_b Y_b}{y_b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{x_w}{y_w} \\ 1 \\ \frac{z_w}{y_w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_r}{y_r} & \frac{x_g}{y_g} & \frac{x_b}{y_b} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{z_r}{y_r} & \frac{z_g}{y_g} & \frac{z_b}{y_b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_r & 0 & 0 \\ 0 & Y_g & 0 \\ 0 & 0 & Y_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{x_w}{y_w} \\ 1 \\ \frac{z_w}{y_w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_r/y_r & 0 & 0 \\ 0 & Y_g/y_g & 0 \\ 0 & 0 & Y_b/y_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

# Преобразование цветных пространств заданных точкой белого

---

$$\begin{pmatrix} \frac{x_w}{y_w} \\ 1 \\ \frac{z_w}{y_w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_r/y_r & 0 & 0 \\ 0 & Y_g/y_g & 0 \\ 0 & 0 & Y_b/y_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} W = \begin{pmatrix} \frac{x_w}{y_w} \\ 1 \\ \frac{z_w}{y_w} \end{pmatrix} K = \begin{pmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_r \end{pmatrix} G = \begin{pmatrix} Y_r/y_r & 0 & 0 \\ 0 & Y_g/y_g & 0 \\ 0 & 0 & Y_b/y_b \end{pmatrix},$$

$$W = KGF \Rightarrow GF = K^{-1}W, V = GF \Rightarrow V = K^{-1}W$$

$$M = KG$$

# Результирующий алгоритм вычисления матрицы преобразования

---

1. Строим  $W$  и  $K$  по данным монитора
2. Вычисляем  $V=K^{-1}W$
3. Строим матрицу  $G$  по  $V$
4.  $M=KG$ .

# Хроматическая адаптация

---

- Человеческое восприятие цвета позволяет широкий диапазон адаптации к цвету источника света (хроматическая адаптация)
- Если плавно менять цвет источника освещения, человек будет воспринимать цвет поверхности таким же! (color constancy)
- Хотя измерение цвета покажет другой спектр и другие значения CIE XYZ



# Проблемы адаптации = проблемы визуализации

---

- При просмотре некоторой реальной сцены можно считать наблюдателя адаптированным к освещению этой сцены
- При просмотре изображения этой сцены на экране, наблюдатель адаптирован к освещению помещения и параметрам монитора (точка белого)
- В общем случае адаптация разная и изображения выглядят по-разному!

# Как скорректировать?

---

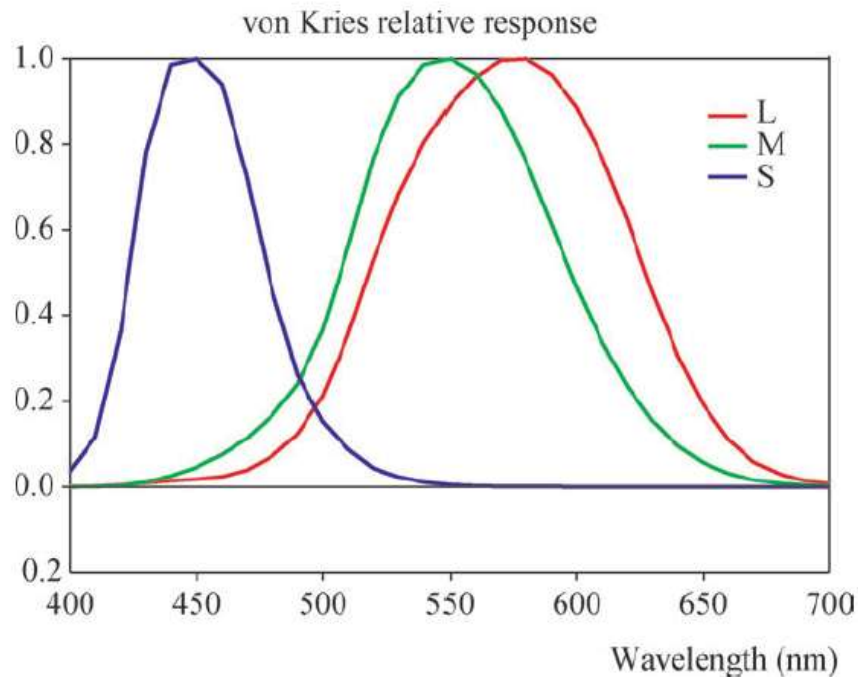
- Знаем точку белого виртуальной сцены
- Знаем точку белого для просмотра (к которой сейчас адаптирован наблюдатель)
- Необходимо построить преобразование, которое преобразует цвет каждого пикселя изображения к нужной адаптации.

# Модель von Kries (Иоганн Крис)

---

- В 1902 г. Von Kries предположил, что хроматическая адаптация протекает независимо на трех типах колбочек
- Следовательно, хроматическая адаптация может быть смоделирована преобразованием XYZ в LMS (cone response domain) и индивидуальным масштабированием компонент

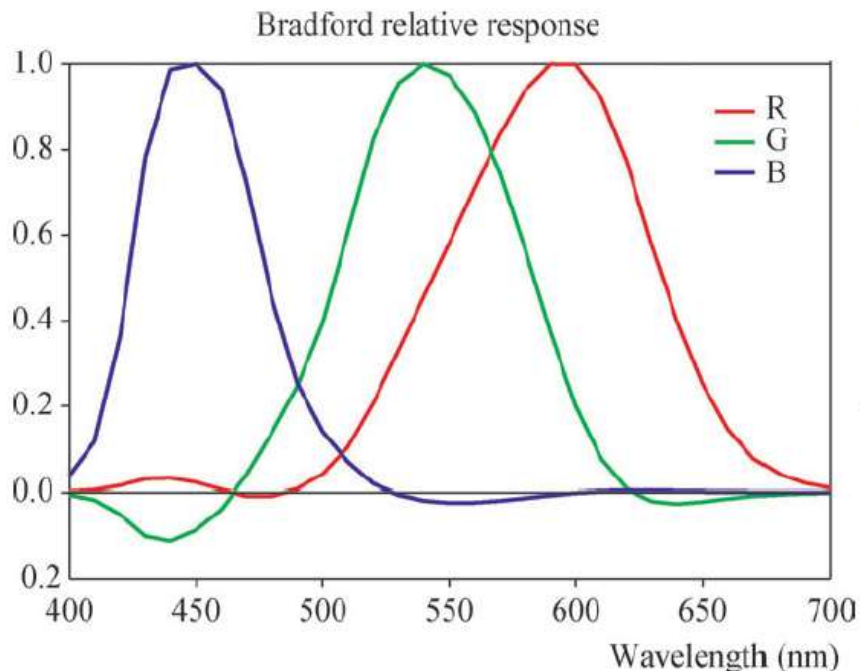
# Функции отклика von Kries



$$M_{\text{vonKries}} = \begin{bmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$M_{\text{vonKries}}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.9102 & -1.1121 & 0.2019 \\ 0.3710 & 0.6291 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

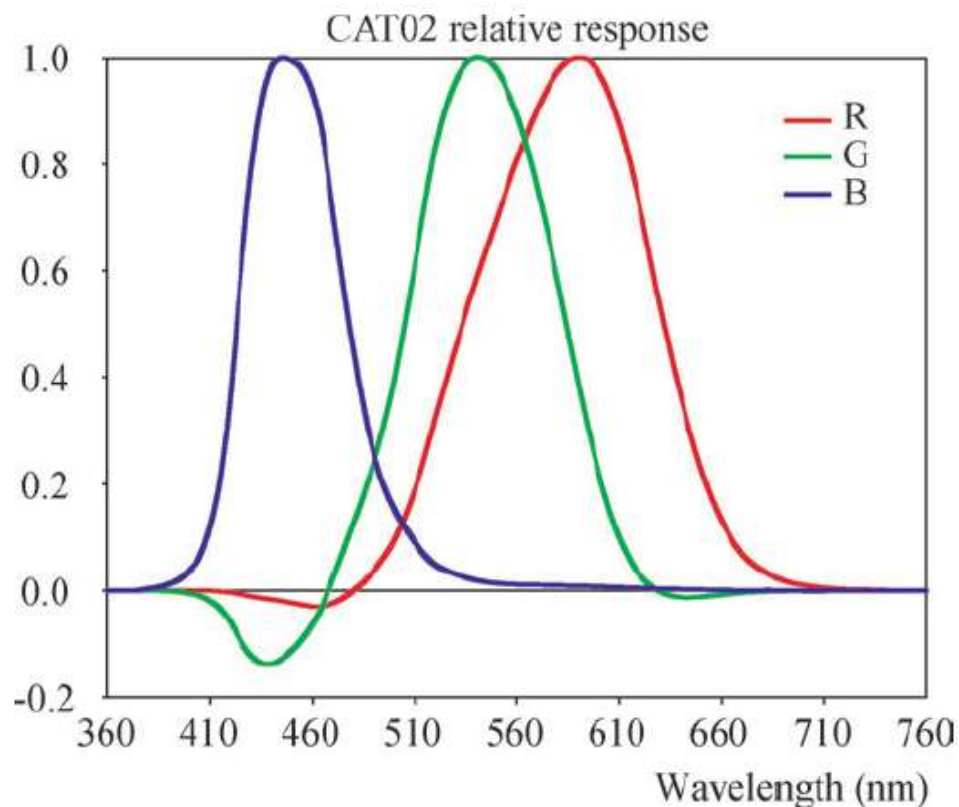
# Функции отклика Bradford



$$M_{\text{Bradford}} = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix}$$

$$M_{\text{Bradford}}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.9870 & -0.1471 & 0.1600 \\ 0.4323 & 0.5184 & 0.0493 \\ -0.0085 & 0.0400 & 0.9685 \end{bmatrix}$$

# Функции отклика CAT02



$$\text{CAT02} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix}$$

$$\text{CAT02}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0961 & -0.2789 & 0.1827 \\ 0.4544 & 0.4735 & 0.0721 \\ -0.0096 & -0.0057 & 1.0153 \end{bmatrix}$$

# Алгоритм получения матрицы хроматического преобразования

---

- 1. Находим координаты точек белого в LMS
- 2. Находим коэффициенты масштабирования как отношения соответствующих координат
- 3. Для заданного цвета в XYZ
  - 1. Переводим его в LMS
  - 2. Масштабируем
  - 3. Возвращаем назад в XYZ

$$\begin{bmatrix} \rho_S \\ \gamma_S \\ \beta_S \end{bmatrix} = M_{\text{cat}} \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \rho_D \\ \gamma_D \\ \beta_D \end{bmatrix} = M_{\text{cat}} \begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix},$$

# В матричном виде

---

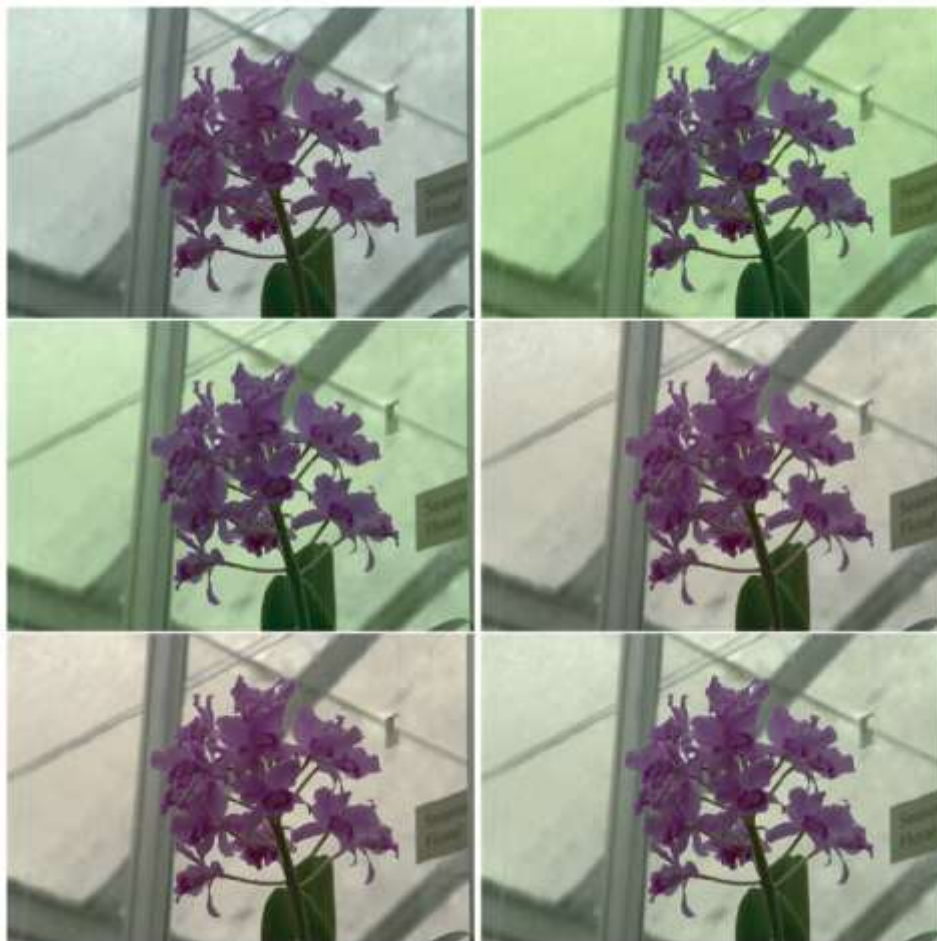
- Можно построить суммарное преобразование в матричном виде:

$$M = M_{\text{cat}}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_D/\rho_S & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_D/\gamma_S & 0 \\ 0 & 0 & \beta_D/\beta_S \end{bmatrix} M_{\text{cat}}$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$



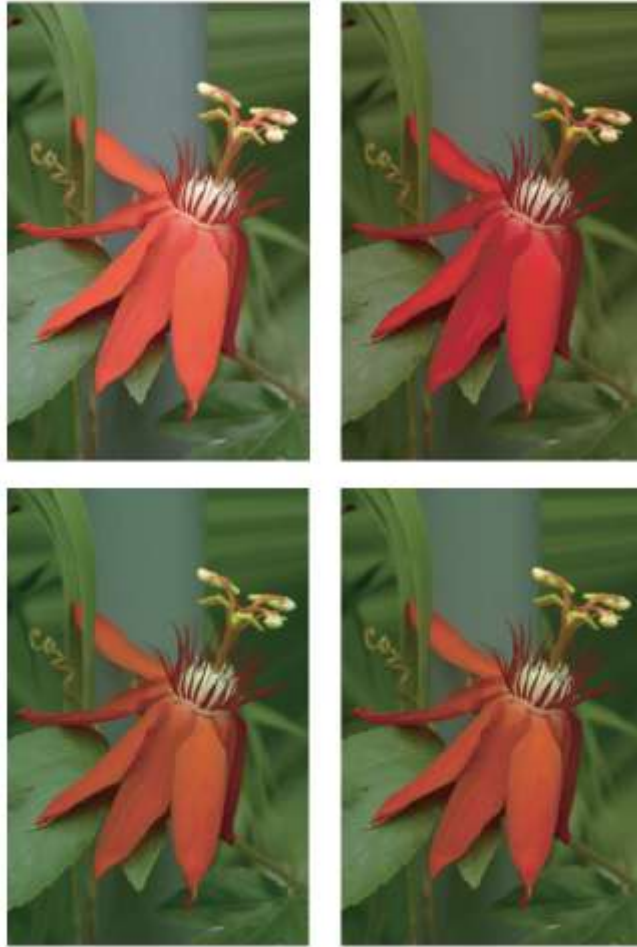
# Пример адаптации под разные источники



**FIGURE 2.15** CAT02 chromatic adaptation. In reading order: original image, followed by five images chromatically adapted from D<sub>65</sub> to incandescent, tungsten, D<sub>50</sub>, E, and F2.

# Разные операторы хроматической адаптации

---



# Построение спектра по цвету

---

- Часто мы не можем узнать спектр источника света
  - В качестве источника берется изображения
  - Дизайнер задает цвет источника вручную (pick color), т.к. достаточно сложно моделировать сразу спектр, имеющий определенный цвет после рендеринга
- Встает задача получения спектра источника по его цвету
- Очевидно, может быть решена многими способами

# Постановка задачи

---

- **На входе:** тройка  $R=(r,g,b)$  для конкретного пространства
- **На выходе:** спектр  $S(\lambda)$ , такой, что синтетический источник с этим спектром будет давать в этом пространстве цвет  $R$

# Алгоритм решения задачи

---

1. Переходим в пространство CIE 1931 XYZ:  $X=(x,y,z)$ .  
 $X = MR$ .
  - Далее подбираем нужный спектр для соответствия этому цвету.
2. Задаем три базовых спектра  $F1(\lambda)$ ,  $F2(\lambda)$ ,  $F3(\lambda)$ 
  - Результирующий спектр будем получать их комбинацией
3. Рассчитываем коэффициенты весов

# Этап 1: $(r,g,b) \rightarrow (x,y,z)$

---

Применяем:

- либо матрицу для одного из стандартных RGB-пространств
- Либо преобразование на основе «фосфоров» конкретного монитора
- $X=(x,y,z)$ .  $X = MR$ .

## Этап 2: F1, F2, F3

---

- Нужно выбрать любые линейно независимые функции
- Для примера возьмем дельта-функции для разных длин волн:

$\delta_1(\lambda), \delta_2(\lambda), \delta_3(\lambda)$

Результирующий спектр будем строить в таком виде:

$$S(\lambda) = a_1 \delta_1(\lambda) + a_2 \delta_2(\lambda) + a_3 \delta_3(\lambda)$$

Задача – найти  $a_1, a_2, a_3$  такие, чтобы спектр целиком соответствовал  $(x, y, z)$

## Этап 3: расчет $a_1, a_2, a_3$

---

$$\begin{aligned} X &= \int x(\lambda)S(\lambda)d\lambda = \\ &= x(\lambda_1)a_1 + x(\lambda_2)a_2 + x(\lambda_3)a_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y &= \int y(\lambda)S(\lambda)d\lambda = \\ &= y(\lambda_1)a_1 + y(\lambda_2)a_2 + y(\lambda_3)a_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z &= \int z(\lambda)S(\lambda)d\lambda = \\ &= z(\lambda_1)a_1 + z(\lambda_2)a_2 + z(\lambda_3)a_3 \end{aligned}$$



## Этап 3: расчет $a_1, a_2, a_3$

---

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda_1) & \bar{x}(\lambda_2) & \bar{x}(\lambda_3) \\ \bar{y}(\lambda_1) & \bar{y}(\lambda_2) & \bar{y}(\lambda_3) \\ \bar{z}(\lambda_1) & \bar{z}(\lambda_3) & \bar{z}(\lambda_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$$

Получили матрицу  $C$  

- $A = C^{-1}X$
- $X = MR$ .
- $\Rightarrow \mathbf{A = C^{-1}MR}$

# Особенности и проблемы метода

---

- Предложенное решение на основе спектра с дельта-функциями может является проблемой при визуализации, т.к. спектр разрывный
- В качестве базовых можно взять другие, непрерывные функции
- Можно получить отрицательный спектр!

# Литература по построению спектра

---

- Glassner, A. 1989. How to derive a spectrum from an RGB triplet. *Computer Graphics and Applications, IEEE*: 95-99
- Жданов, Д., Потемин, И. 2010. Построение спектрального представления из RGB данных в задачах спектрального моделирования. In *GraphiCon'2010*.  
<http://www.graphicon.ru/proceedings/2010/conference/RU/Se1/59.pdf>.
- Татаринов А., Игнатенко А. Спектральный цвет и его реконструкция из RGB. *Компьютерная графика и мультимедиа*. Выпуск №4(3)/2006.  
<http://cgm.computergraphics.ru/content/view/117>

# ИТОГИ

---

- Точка белого – применяется при описании реальных RGB-систем (и не только). Часто характеризуется цветовой температурой
- Цветовая температура – температура абсолютно черного тела, соответствующему данному цвету
- Хроматическая адаптация – процесс преобразования цветового пространства для учета адаптации человека к освещению
- Построение спектра по цвету – задача, которую приходится решать в системах фотореалистичного синтеза для получения спектров источников и спектров отражений

- 
- В следующий раз: гамма, гамма-коррекция, гамма-кодирование, кривая калибровки камеры